



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

SERVOTOIMISEN LABYRINTTIPELIN RA- KENTAMINEN DEMOLAITTEEKSI

Laitteen rakentaminen

Lauri Hiekkalahti

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Kone- ja tuotantotekniikka
Koneautomaatio



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Koneautomaatio

HIEKKALAHTI, LAURI:

Servotoimisen labyrinthipelin rakentaminen demolaitteeksi
Laitteen rakentaminen

Opinnäytetyö 42 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Toukokuu 2016

Tässä opinnäytetyössä oli tehtävänä rakentaa Protacon-konsernille uusi messukäyttöön tarkoitettu demolaite, jonka avulla voidaan esitellä konsernin päätoiminta-alueita ja teknologiaosaamista. Demolaitteeksi määritettiin servotoiminen labyrinthipeli. Pelille asetettiin tavoitteeksi toimia niin viiveettömästi ja luotettavasti, että sen käyttäjät pystyvät kilpailemaan nopeudella ja reittivalinnoilla.

Työssä tutustuttiin laitteen rakentamiseen, jossa suunnittelupöydältä edettiin komponenttivalintojen kautta kokoonpanoon, ohjelmointiin ja virittämiseen. Ohjelmoinnissa perehdyttiin Beckhoffin TwinCAT 3 – ohjelmointiympäristöön ja sen moottorienohjausjärjestelmään.

Opinnäytetyön tutkimuksellinen osuus painottui servojärjestelmien viiveiden syntymiseen ja sen perusteluun, miksi servojärjestelmää ei voida reaaliaikaisella vasteajalla toteuttaa. Tutkimusmenetelmänä oli laadullinen tutkimus. Työn aloitusvaiheessa oletuksena oli, että järjestelmää ei voida toteuttaa täysin viiveettömäksi.

Lopputuloksena syntyi labyrinthipeli aikataulun mukaisesti. Kaikissa asetetuissa tavoitteissa ei onnistuttu, ja ennalta määritetty budjetti jouduttiin ylittämään. Budjetin ylityksellä saatiin muut asetetut tavoitteet toteutettua toiminnollisuuksien kannalta. Laitteelle ei myöskään onnistuttu toteuttamaan täydellistä viiveettömyyttä johtuen järjestelmän komponenttien sisäisistä ominaisuuksista synnyttää viivettä.

Asiasanat: laitteen rakentaminen, automaatio, servomoottori, plc, twincat, säätöjärjestelmä.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Mechanical and Production Engineering
Machine Automation

HIEKKALAHTI, LAURI:
Servomotor Functioning Labyrinth Game
Machine building

Bachelor's thesis 42 pages, appendices 4 pages
May 2016

The purpose of this thesis was to design and build a new demo device for Protacon Group to be used at exhibitions to present the main business areas and technology knowledge. The demo device was a servomotor functioning labyrinth game. Target was set to real-time responsiveness and reliably that users are able to compete with speed and route choices.

The thesis included basic machine building; from drawing board to component choosing, through assembly to programming and tuning. In programming design was familiarized with Beckhoffs TwinCAT 3 – software developing environment and its motion control system.

The research part of the thesis focused on servo system's delays and answers why real-time response cannot be achieved. Qualitative research method was used and the work started with pre-assumption that the system cannot be implemented without delay.

As a result, the practical phase produced the labyrinth game as scheduled. Although all of the objectives were not achieved and pre-determined budget was exceeded. With an extra budget other objectives were tackled. Perfect real-time response also failed to be achieved due to system's internal components natural properties to generate delay.

Key words: machine building, automation, servo motors, plc, twincat, control system.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TIETOA TOMEKSIANTAJASTA.....	7
2.1	Protacon Group	7
2.2	Protacon Oy	7
3	TOTEUTUKSEN SUUNNITELMAT.....	8
3.1	Projektisuunnitelma	8
3.2	Materiaalivalinnat	8
3.3	Mekaniikkasuunnittelu.....	10
3.3.1	Työkuvat ja alihankinta.....	10
3.3.2	Mekanismin suunnittelu.....	10
3.4	Sähkösuunnittelu.....	13
4	KOMPONENTTIVALINNAT	14
4.1	PLC-automaatiolaitteisto	14
4.1.1	Logiikka	14
4.1.2	Servomootorit ja vaihde.....	15
4.1.3	Lisäkortit	16
4.2	Liikeohjauksen anturi	17
4.3	Konenäköjärjestelmä	18
5	MEKANIIKAN KASAAMINEN	20
5.1	Komponenttien yhdistäminen.....	20
5.2	Sähkökytkennät ja elektroniikkakomponentit	22
5.3	Mekaaninen virittäminen ja säätö	23
6	OHJELMISTOSUUNNITTELU.....	24
6.1	Logiikkaohjaus.....	24
6.2	TwinCAT ohjelmointiympäristö.....	25
6.3	Sovellussuunnittelu.....	26
6.3.1	Anturidata ja skaalauslohko	26
6.3.2	Moottorien ohjelmointi ja virittäminen.....	27
7	JÄRJESTELMÄN VASTE	30
7.1	Algoritmi servo-ohjauksessa.....	30
7.2	Servo-ohjauksen virheet ja suorituskyvyn tehostaminen.....	31
7.3	Takaisinkytkennän ongelmat	32
8	POHDINTA.....	34
	LÄHTEET.....	36
	LIITTEET	38
	Liite 1. Messujulkaisu	38

LYHENTEET JA TERMIT

ADS	Automation Device Specification
CLR	Common Language Runtime
NC	Numeerinen ohjaus
PLC	Ohjelmoitavaalogiikka
PoE	Power over Ethernet
Protacon	Protacon – konserni
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
XFC	Extreme fast control (Beckhoffin markkinointinimike)

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Protacon Oy:n tilauksesta ja suunnattu heille uudeksi messuille tarkoitettavaksi demolaitteeksi kuvastamaan hieman pilke silmäkulmassa yrityksen pääosaamisalueita. Tavoitteena laitteella on osoittaa mahdollisimman hyvin yleisölle Protacon-konsernin suunnitteluosaamista houkuttelevalla tavalla sisältäen aitoja teollisuudessa käytettyjä komponentteja.

Työssä käytettiin sellaisia laitteita ja tekniikoita, jotka edustavat Protaconin käyttämää teknologiaa tämän opinnäytetyön kirjoituksen hetkellä. Laitteen rakentamisessa on ollut mukana tavara- ja laitetoimittajia omalla panoksellaan. Projektin aikatauluna oli saada Alihankinta 2015 – messuja varten toteutettua uusi messuvetonaula.

Ajatus kyseisenlaiseen messudemoon on lähtenyt jo aiemmin Protaconin kahvipöytäkeskusteluissa tarpeen herättyä seuraavan sukupolven messulaitteelle. Aihe kuitenkin on jäänyt odottamaan tekijäänsä muiden projektien ohella. Vetonaulaksi oli suunniteltu servo-toimista labyrinthipeliä, jota käyttäjä (pelaaja) ohjaa kallisteltavan käsiohjaimen avulla. Laitteen tarkoituksena on toimia niin luotettavasti ja reaaliaikaisesti, että käyttäjät voivat kilpailla nopeudella ja mahdollisesti reittivalinnoilla.

Opinnäytetyön tutkimusongelmana on servo-ohjauksen vasteajan toteutuminen ja työssä tutkitaan vasteen muodostumista. Tavoitteena servomoottorien toiminnalle on reaaliaikainen vaste. Tutkimusta aloittaessa olettamuksena on, että reaaliaikaisuuteen ei ole mahdollista päästä.

2 TIETOA TOMEKSIANTAJASTA

2.1 Protacon Group

Protacon Group Oy on konserni, joka koostuu viidestä tulosvastuullisesta osakeyhtiöstä. Protacon Groupilla on toimipaikat Jyväskylässä (pääkonttori), Espoossa, Hollolassa, Joensuussa, Kajaanissa, Oulussa, Savonlinnassa, Tampereella ja Vaasassa. (Protacon Group 2015.)

Protacon Group on suomalainen teknologia-alan suunnittelu- ja palveluyritys. Protacon tuottaa asiakkailleen tehokkaita ja joustavia ratkaisuja tuotannon ja ylläpidon tarpeisiin. Palvelut kattavat konsultoinnin, suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon. Toiminnan lähtökohtana ovat pitkät asiakassuhteet, toimituksiin sitoutuminen ja ennakkoluuloton teknologian hyödyntäminen. (Protacon Group 2015.)

Protacon työllistää yli 200 automaation, sähköistyksen ja informaatioteknologian ammattilaista. Asiakkaitamme ovat erityisesti energia-, metsä- ja konepajateollisuuden sekä infrastruktuurialojen yritykset. (Protacon Group 2015.)

2.2 Protacon Oy

Protacon yhtiöiden yhtenä osana on Protacon Oy, jonka pääosaamisena on teollisuuden projekteissa ja ylläpidossa tarvittavat automaatioon liittyvät palvelut, kuten:

- Hydrauliikka- ja pneumatiikkasuunnittelu
- Laitossuunnittelu
- Prosessisähköistys ja instrumentointi
- Sähkökäytöt

(Protacon Group 2015)

3 TOTEUTUKSEN SUUNNITELMAT

3.1 Projektisuunnitelma

Projektin käynnistämiseksi johdolta haettiin hyväksyntä, jota varten tehtiin esiselvitys tarpeista ja suunnitelma aikataulusta. Projektisuunnitelmassa vastattiin peruskysymyksiin; mitä tehdään, miksi ja miten. Suunnitelmassa kerrotaan ongelma tai tarve, esitetään ratkaisu, toteutus ja kustannuslaskelma.

Projektisuunnitelmassa luodaan puitteet projektille. Ennen projektin varsinaista aloittamista oli anottava resursseja. Resursseja anoessa pyritään ennakoimaan mahdollisia haasteita ajan, rahan ja materiaalien suhteen varsinkin, jos aihealue on uusi.

Aikataulu arvioitiin tässä kohtaa seuraavasti:

- Projektin aloitus heti hyväksynnän saatua (toukokuu)
- Mekaniikka suunnittelu ja materiaalivalinnat (kesäkuun alku)
- Pääkomponenttivalinnat (kesäkuun alku)
- Mekaniikan kasaaminen (kesäkuun loppu)
- Ohjelmasuunnittelu (heinäkuu)
- Viritys ja testaus (elokuu)
- Käyttöönotto 15.9.2015

3.2 Materiaalivalinnat

Materiaalivalinnoissa määrittävinä seikkoina oli riittävä mekaaninen kestävyys, työstettävyys, hinta ja ulkonäkö. Labyrintin kokonaismateriaalivaihtoehtona harkittiin aluksi puuta helpon työstettävyyden ansiosta, mutta hylättiin ulkonäköseikkojen vuoksi.

Labyrinttilaudalle materiaaliksi valittiin 20 mm paksu akryylilevy (ns. plexilasi), joka jyrksittiin Tampereen Liikeacryl Oy:ssä (kuva 1). Akryylin valintaan päädyttiin sen hyvien työstöominaisuuksien vuoksi. Labyrintin muodostamisessa mietittiin myös vaihtoehtona palasten leikkaamista ja liimaamista, mutta se nähtiin epäolennaisen osaamisen esiintuomisena ja liian työläänä vaihtoehtona.



KUVA 1. Akryylistä valmistettu labyrintti-pelilauta (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

Pelin runkomateriaaleja ei vertailtu sen enempää, kun puu materiaalina oli pudotettu vaihtoehtoista pois. Materiaaliksi valittiin 2 mm alumiinilevy ja se toteutettiin mm. paljon prototyypppejä valmistavalla Tampereen HT-laser Oy:llä (kuva 2). Alumiini materiaalina valittiin keveyden, kestävyys ja ulkoisten ominaisuuksien vuoksi.

Alumiinilevyn vahvuuksia on useita - alkaen 2 mm:stä. Pelinrungolle ei nähty alkuperäisessä suunnitelmassa suurempia lujuusvaatimuksia, joten ohuin materiaalivevaihtoehto oli luontevin valinta edullisimman hinnan vuoksi.



KUVA 2. Labyrintin kehikko, runko (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

3.3 Mekaniikkasuunnittelu

3.3.1 Työkuvat ja alihankinta

Mekaniikkasuunnittelussa oli tavoitteena tehdä työkuvat kaikista ulkopuolisilla teetetävistä osista. Työkuvista tuli käydä ilmi suunniteltujen rakenteiden olennaiset mitat ja osien kiinnittymiset toisiinsa.

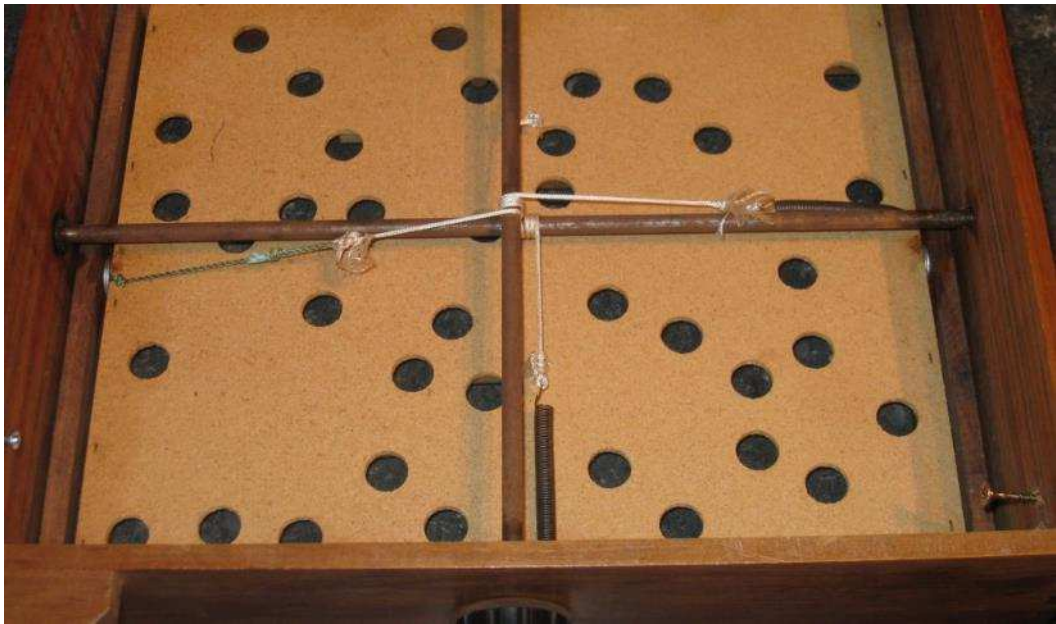
Metalliosien suunnittelussa oli huomioitava leikattavien osien tarkat mitat ja taivutuskohdat. Suunnittelussa käytettiin hyödyksi Autodesk Inventor – 3D-suunnitteluohjelmaa, jossa on ohutlevysuunnittelun avuksi kehitettyjä automaattisia ominaisuuksia.

Ohutlevyysuunnittelu perinteisillä menetelmillä olisi ollut erityisen haastavaa. Valmiin tuotteen mitoituskuvien lisäksi pitää olla levityskuvat, joista tulee käydä esiin taivutettavan levyn mitat. Tarkka mitoittaminen on tärkeää laadukkaan lopputuloksen varmistamiseksi. Koska kokemusta levityskuvien tekemisestä ei juuri ollut, turvauduttiin ohjelman automaattisiin ominaisuuksiin.

Labyrintin työkuvien suunnittelu oli varsin suoraviivaista. Tampereen Liikeacrylille riitti dxf-muodossa oleva layout-kuva, joka syötettiin suoraan automaattijyrsimelle. Radan suunnitteluun riitti 2D-suunnitteluohjelma ja siihen käytettiin Kymdata CADS – suunnitteluohjelmaa. Radan suunnittelussa oli huomioitava pallon kulkema reitti, radan sopiva haasteellisuus ja reikien sijoittaminen.

3.3.2 Mekanismin suunnittelu

Mekaniikkasuunnittelun yksi vaikeimmista osa-alueista oli ratkaista laudan liikemekanismi. Alkuperäisen puisen labyrinttipelin mekaniikka oli toteutettu (kuva 3) kahdella akselilla, joita pyöritetään puisista nupeista. Akseleihin on kierretty naru, joka on toisesta päästä kiinni liikutettavassa tasossa ja toisesta taas jousen avulla pelin runkoon. Nuppia kääntämällä saadaan akselin suhteen käännettyä lautaa, joka palautuu keskiasentoon jousipalautteisesti.



KUVA 3. Alkuperäisen labyrinttipelin mekaniikka (Instructables.com)

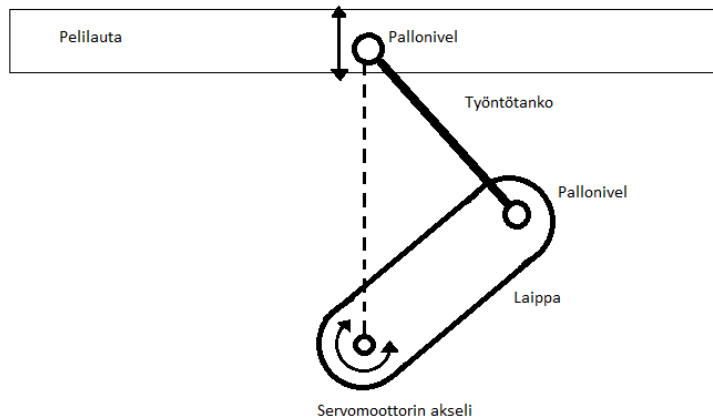
Alkuperäisen mekaniikan tuomista toteutettavaan versioon harkittiin, mutta se ei vaikuttanut kestävältä ratkaisulta. Narujen ja jousien virittäminen ja kalibrointi olisi todennäköisesti ollut haastavaa, joten tätä ratkaisua ei haluttu viedä toteutukseen.

Ratkaisuksi löydettiin nollamomenttipisteiden hyödyntäminen. Pelilaudan paino kannateltiin keskeltä murtonivelellä (kuva 4), joka kiinnitettiin pelikehikon rungon pohjaan. Murtonivel pystyy pyörimään vapaasti 45° kulmaan asti, mikä tarkoittaa kaikkien pelilaudan tarvitsemien kallistuskulmien ($\pm 13^\circ$) onnistumista.



KUVA 4. Murtonivel (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

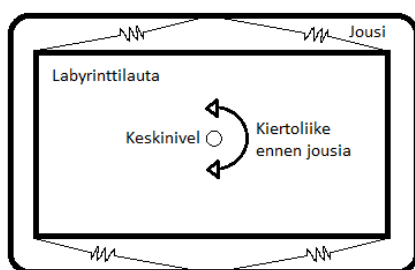
Laudan kallistuksen mekanismi (kuva 5) toteutettiin suunnittelemalla servomoottorien akseleihin laippalevyt, joihin kiinnitettiin pallonivelöidyt työntötangot. Nivel on kiinnitetty pelilaudan kunkin sivun keskipisteeseen, jossa on nollamomentti toisen akselin kiertoliikkeeseen nähden. Niveliin laitettiin pallonivelet varmistamaan mahdollisimman vapaan liikkuvuuden ja toiminnan myös kulmassa.



KUVA 5. Kallistusmekanismin periaatekuva

Ongelmaksi kuitenkin muodostui mekaniikan kasaamisen jälkeen pallonivelien antama vapaus, joka aiheutti laudan tason suuntaisen kiertymisen. Kiertymisliikkeen poistamiseksi harkittiin erilaisia menetelmiä, jossa laudan reunaan tulisi rullat ja ohjainkiskojen avulla liike mahdollistettaisiin ainoastaan halutuissa suunnissa. Rulla – kisko – menetelmä olisi ollut kuitenkin monimutkainen toteuttaa ja sille kehitettiin vaihtoehtoinen toteutustapa.

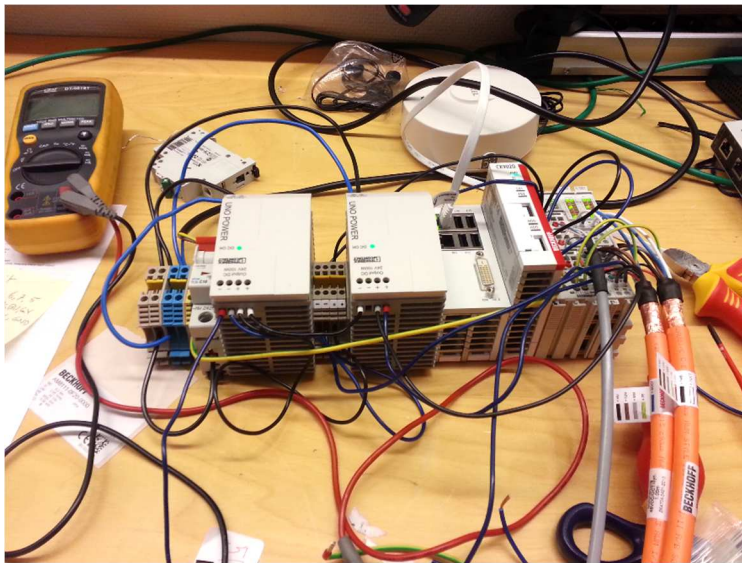
Labyrinttilauta kiinnitettiin jousien avulla kotelon runkoon kiertoliikkeen estämiseksi (kuva 6) ja kiristettiin niin, että lauta pingottui oikeaan asentoonsa. Jouset toivat kallistukseen jonkin verran vastusta, mutta servomoottorien riittävän suuren vääntömomentin ansiosta vastuksella ei ollut liikkeeseen havaittavaa merkitystä.



KUVA 6. Kiertoliikkeen estäminen jousien avulla

3.4 Sähkösuunnittelu

Pelin sähkösuunnittelussa tuli huomioida 230 V verkkojännitteen muuntaminen 24 volttiin ja 48 volttiin tasajännitettä. Servomoottorien 48 V:a otettiin kahdesta sarjaankytketystä 24 V:n teholähteestä, joista ensimmäinen syötti muille komponenteille 24 V. Kytkennoistä tehtiin ennen toteutusta piirikaavio CADS:illä ja testaus toimivuudesta ennen kotelointia (kuva 7). Turvalaitteina oikosulkuja varten piiriin laitettiin B6 johdonsuojakatkaisija.



KUVA 7. Testikytkenöt (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

Sähkösuunnittelussa huomioitiin vielä komponenttien vaatima tilatarve ja sijoittaminen omaan koteloonsa. Sijoittelusta tehtiin layout-suunnitelma, jonka mitoituksen mukaan tilattiin sopiva kotelo komponentteja varten.

4 KOMPONENTTIVALINNAT

4.1 PLC-automaatiolaitteisto

Komponenttien valinnassa haluttiin hyödyntää Protacon yhtiöiden yhteistyökumppaneita ja tästä syystä logiikka toimittajaksi valittiin Beckhoff Automation. Beckhoff on Siemenin ohella yksi käytetyimpiä logiikkavalmistajia, ja on toiminut alalla vuodesta 1980 asti.

Logiikkavalinnoissa hyödynnettiin Beckhoffin osaamista teollisuuden erilaisista soveluksista ja pyydettiin ehdotusta käytettävistä komponenteista. Tarpeena oli lähtökohtaisesti kahdelle pelilautaa liikuttavalla servomootorille, logiikkayksikölle ja lisäkorteille. Yhteisen neuvottelupalaverin pohjalta saatiin Beckhoffin tarjous hyödynnettävistä komponenteista.

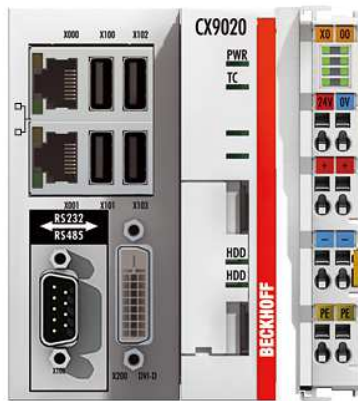
4.1.1 Logiikka

PLC eli ohjelmoitava-logiikka on olennaisin osa nykypäiväistä automaatiolaitteistoa. Ohjelmoitavat-logiikat ovat korvanneet monimutkaiset relejärjestelmät, joita ennen käytettiin toiminnallisten prosessien ohjaukseen. Logiikat ovat prosessoripohjaisia järjestelmiä omalla laskentateholla ja muistilla. (Beckhoff 2015. Embedded PCs and motherboards for industrial control tasks.)

Beckhoffin valmistamat ohjausyksiköt pohjautuvat Microsoft Windows embedded – sulautettuun ympäristöön. Poiketen perinteisestä Windows – pohjaisesta kotitietokoneesta embedded-alusta on räätälöity puhtaasti teollisuuden (tilaajan) tarpeisiin, ja on rakenteeltaan erilainen. Järjestelmän vakaus on toista luokkaa mitä perinteisissä Windows kotitietokoneissa, kuin myös käynnissä olevien prosessien määrä. (Beckhoff 2015. Embedded PCs and motherboards for industrial control tasks.)

Logiikkayksiköt ovat toisin sanottuna pienessä koossa olevia tiekoneita. Komponenttien laadussa ja kestävyudessa on kuitenkin suuremmat kriteerit teollisuuden haastavista käyttöympäristöistä johtuen.

Tässä projektissa käytimme Beckhoffin sulautettua CX9020 PC:tä (kuva 8), joka on DIN-kiskoon kiinnitettävä. PLC-yksikössä on 1 GHz Intel ARM Cortex A8-prosessori ja 1 GB DDR3-muistia. CX9020 valittiin hinta – teho – ominaisuuksien vuoksi. Projektiin haluttiin oma PLC-yksikkö, jotta peliä voidaan pyörittää ilman TwinCAT-ohjelmaa sisältävää PC:tä. Kovin tehokkaalle PLC:lle ei kuitenkaan ollut tarvetta sovelluksen yksinkertaisuuden vuoksi, joten hinnaltaan edullinen logiikka riitti hyvin.



KUVA 8. CX9020 - PLC-yksikkö (Beckhoff 2015, CX9020)

4.1.2 Servomoottorit ja vaihde

Servomoottoreiksi valittiin Beckhoffin uusimman sarjan pienimmät moottorit AM8111 (kuva 9), koska mekanismissa ei ollut suurta väännön tarvetta. Tärkeiksi muodostuneita ominaisuuksia oli nopea vaste ohjaukseen ja tarkkuus suoritetuissa liikkeissä.



KUVA 9. AM8111 - servomoottori ja -ohjainkortti (Beckhoff 2015, AM81xx)

Tarkan ohjattavuuden saavuttamiseksi servomoottoreihin lisättiin planetaarivaihteistot. Vaihteen välityksen ansiosta servomoottoria voitiin ajaa kymmenkertainen matka haluttuun liikkeeseen nähden. Servon suurien nopeuksien ja kiihtyvyyksien ansiosta, saatiin labyrintin ohjaus hyvin tarkaksi ja lyhytvasteiseksi.

AM8111-servomootorille valmistajan ilmoittama nominaalinopeus 48 voltilla tasajännitettä on $4000 \frac{1}{\text{min}}$ (kierrosta minuutissa). Tämä tarkoittaa vaihteen jälkeen noin 6,7 kierrosta sekunnissa ja noin $2400 \frac{^\circ}{\text{s}}$:ssa kulmanopeutta. Yhden asteen muutos tapahtuu nopeimmillaan n. 400 μs :ssa ja täyden 13° kulman saavuttaminen n. 5 ms:ssa huomioimatta PLC:n ja anturin viivettä.

Moottorin tarkkuudessa tärkein vaikuttavatekijä on takaisinkytkennän nopeus. Valmistajan merkintöjen mukaan vakiomallisen AM8111-servomoottorin asentotiedon lukutiheydeksi 16384 pulssia kierrosta kohden ja sen heitoksi $0,17^\circ \pm 600$ astesekuntia kohden (taulukko 1).

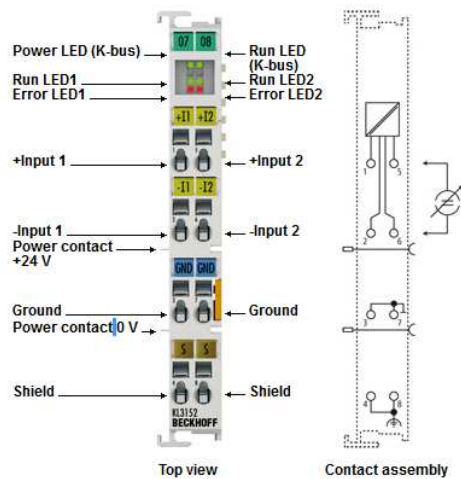
TAULUKKO 1. AM8111 - servomoottorin takaisinkytkennän arvoja (Beckhoff 2015, 17)

Feedback-System	Impulse per rotation	System accuracy	Comment
Resolver	16384	± 600 Angle sec.	approx. 0.17°
OCT 128 SinCos (Multiturn)	33554432	± 120 Angle sec.	approx. 0.03°

4.1.3 Lisäkortit

Beckhoffin logiikkaan kytketään erillisiä ohjainkortteja, joiden tehtävänä on välittää tieto ohjausyksikön ja kytkettyjen laitteiden välillä (esim. servomoottorien tai anturien). Kokonaisuutta kutsutaan io:ksi. Lisäkortteja tässä projektissa oli analogiasisääntulokortti KL3152 ja servo-ohjainkortit EL7201.

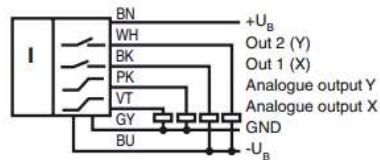
Beckhoffin io voi sisältää melkein lukemattoman määrän erilaisia io-kortteja, mutta näistä tavanomaisimpia ovat yksinkertaiset digitaaliset sisään- (esim. EL 1008) ja ulostulokortit (EL 2008). Korttimäärien kasvaessa suureksi tarvitsee väleihin lisätä jännitesyöttökortteja (EL 9110).



KUVA 11. Beckhoff KL3152 analogiasisääntulo-lisäkortti (Beckhoff 2015, KL3152)

Electrical connection

Standard symbol/Connection:



KUVA 12. Anturin kytkentäohje (Pepperl+Fuchs 2015)

4.3 Konenäköjärjestelmä

Konenäkökameran käyttöä projektissa pidettiin optiona, mikäli ennalta määritetyt resurssit (aika ja budjetti) riittävät. Projektin pysyttyä suunnitellussa aikataulussa ja käytössä ollut budjetti pysyi suurin piirtein sovitussa, saatiin lupa toteuttaa konenäköjärjestelmä pelin informaation tulkitsemiseen.

Konenäköjärjestelmän tarkoituksena oli tulkita pallon liikkeet pelilaudalla ja kerätä siitä tarvittava informaatio kilpailuolosuhteiden järjestämiseksi. Huomioitavia seikkoja pelin kannalta oli:

- Pallo on laudalla
- Pallo ei ole laudalla
- Palloja on enemmän kuin yksi laudalla
- Montako kertaa pallo on ollut laudalla
- Pallo on saavuttanut maalin
- Pallon kulkema matka ja aika ensimmäisestä havainnosta kadottamiseen asti

Koska tarpeet konenäköjärjestelmältä oli hyvin selkeät ja yksinkertaiset, kameraksi kelpasi yksinkertainen, hinnaltaan edullinen harmaasävykamera. Tavarantoimittajaa selvitettiin Protacon Groupin sisällä ja tarjousta laitteistosta päätettiin pyytää Stemmer Imaging Oy:ltä. Stemmer Imagingin tarjouksen perusteella kameraksi valittiin Allied Vision Mako G-131 PoE – konenäkökamera (kuva 13) ja linssiksi kiinteällä 8,5 mm polttovälillä oleva RICOH FL-CC0815B-VG.



KUVA 13. Allied Vision Mako G-131 PoE – konenäkökamera (Allied Vision 2015)

Konenäköjärjestelmää toteuttaessa on huomioitava riittävä ja oikeanlainen valaistus, jotta järjestelmä toimii oikein. Valaistukseksi toteutettiin 900 lm putkimainen led-valaisin (kuva 14), joka asennettiin pelilaudan päälle kameran viereen.



KUVA 14. Valaisin asennettuna pelilaudan päälle (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

5 MEKANIIKAN KASAAMINEN

5.1 Komponenttien yhdistäminen

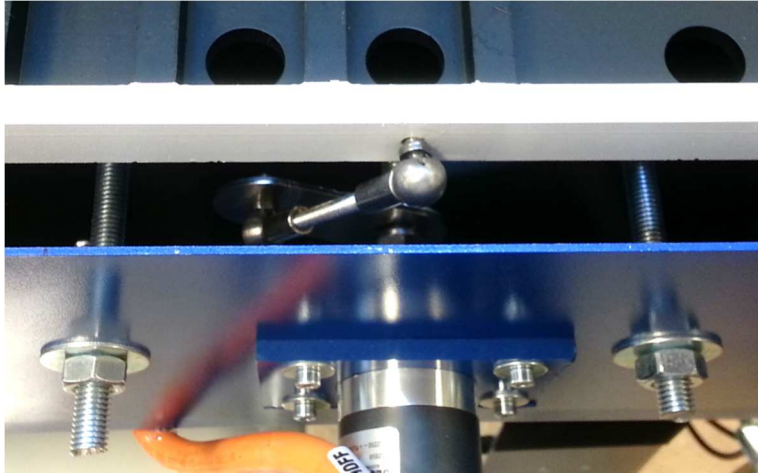
Mekaniikan kasaaminen ja komponenttien yhdistäminen toisiinsa oli haastavaa ja aikaa vievää, sillä tämän kaltaisen projektin läpivieminen ei varsinaisesti kuulu Protaconin kaltaisen suunnittelutoimiston toimialueisiin. Asioissa edettiin kuitenkin ongelma kerrallaan ja pyrittiin löytämään aina helpoin ja yksinkertainen toteutus.

Servomoottorien kiinnityksien suunnittelussa oli sattunut virhe, joka hidasti moottorien kiinnittämistä. Kiinnitysreiät ja läpiviennit oli suunniteltu servomoottorille suoraan, eikä suunnittelussa huomioitu, että moottoreihin kiinnitetään vaihteistot. Vaihteistoissa olevat kiinnitysreiät eivät sopineet suoraan suunniteltuihin reikiin. Asia kuitenkin ratkaistiin akryylistä valmistetuilla sovituskappaleilla (kuva 15).



KUVA 15. Akryylistä valmistettu sovituskappale servomoottorin kiinnittämiseksi (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

Servojen kiinnittämisen jälkeen oli yhdistettävä servojen akselit pelilautaa liikuttavaan mekanismiin. Ratkaisuna päädyttiin käyttämään sovellettuja akselikytkimiä ja kierretankoa. Rosterista valmistettuihin laippoihin porattiin reiät ja kierteistettiin M10-kierretangolle sopiviksi. Kierretangon palaset liitettiin akselikytkimen avulla servon akseliin, mihin kierrettiin kierteistetyt laipat ja kiristettiin paikalleen mutterein. Työntötankojen palonivelet kiinnitettiin mutterein laippaan ja pelilautaan (kuva 16).



KUVA 16. Mekanismin kiinnitys laippaan ja pelilautaan (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

Konenäköjärjestelmää varten pelin runkoon laitettiin kiinni alumiiniprofiilista oleva te-
line, johon kamera kiinnitettiin kulmaraudan avulla. Alumiiniprofiiliksi tilattiin SKS:ltä
40x40 mm kooltaan olevaa profiilia, joka asennuksen yhteydessä vasta huomattiin todella
painavaksi ja järeäksi kiinnitettäväksi 2 mm ohueen alumiini levyyn. Runkoa oli jäykis-
tettävä, jotta heiluva profiilipalkki ei aiheuttaisi rungolle rasitusväsymistä.

Rungon jäykistäminen toteutettiin kahdella läpi viedyllä M10-kierretangolla, jotka ovat
kiristetty runkoon. Tangot tukevat runkoa ulkoisen rasituksen kohdistuessa siihen. Ku-
vassa 16 näkyy servomoottorin molemmilla puolilla olevat kierretangot, jotka on asen-
nettu jäykistykseksi.

Pelin haluttiin seisovan omilla jaloillaan, joten pohjaan asennettiin jalat pohjasta läpi-
vietyjen ruuvien avulla. Etupuolen jalkoihin asennettiin kaksi DIN-kiskoa vaakaan, johon
kiinnitettiin sähkökomponentit sisältä kotelo (kuva 17).



KUVA 17. DIN-kiskoon kiinnitetty sähkökotelo (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

5.2 Sähkökytkennät ja elektroniikkakomponentit


Kytkennot toteutettiin suunnitelmien mukaisesti omaan koteloonsa suojalaitteiden kera. Koteloon tuli läpiviennit johdotuksille. Käyttöliittymä-pc:n ja konenäkökameran vaatimat käyttöjännitteet tulivat omien virtalähteidensä kautta.

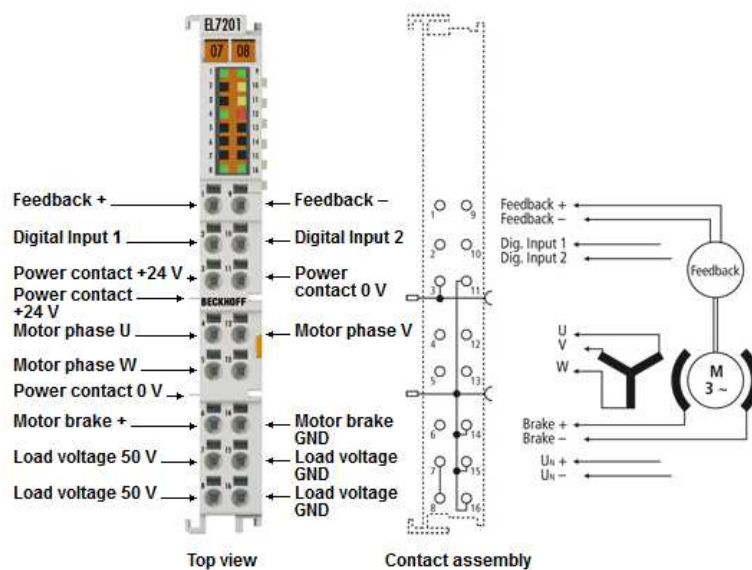
Kotelon takapuolelle DIN-kiskoon kiinnitettiin ethernet-kytkin huolehtimaan laitteiden verkkoyhteyden jakamisesta (kuva 18). Dataliikenneyheyttä tarvitsivat PLC, konenäkökamera ja käyttöliittymä-pc. Servomootorit kytkettiin omilla servokaapeillaan (taulukko 2) PLC:n servo-ohjainkortteihin valmistajan ohjeiden mukaisesti (kuva 19).



KUVA 18. Ethernet-kytkin (Kuva: Lauri Hiekkalahti 2015)

TAULUKKO 2. Servokaapelin kytkentäohje (Beckhoff 2014, 2)

Plug connector	Contact	Function	Core identification	Clamping unit	Plug connector
	A	U	black	4	Flying leads
	B	W	grey	5	
	C	V	brown	12	
	1	Brake +	red	6	
	2	Brake -	black	14	
	3	Temp. + / OCT +	white	1	
	4	Temp. - / OCT -	blue	9	
	5	-	-	-	
	PE	PE	green/yellow	PE	



KUVA 19. Servokortin kytkentäohje (Beckhoff 2015, EL7201)

5.3 Mekaaninen virittäminen ja säätö

Pelilaudan toiminnan kannalta oli viritettävä liikemekanismin vaikuttavia osia samalla, kun ohjelmaa testattiin. Laipan asento ja työntötangon pituus haettiin kokeilemalla oikeiksi. Servot ajettiin manuaalisesti anturin mukaiseen nollakohtaan, johon pelilauta pyrittiin mahdollisimman tarkasti tasoitettua virittämällä mekaanisia osia saamaan.

Laudan suoruuteen ja tasasuuntaiseen kiertoliikkeeseen vaikutti myös jousijärjestelmä, jonka tasainen kireys haettiin säätöruuvien avulla. Jousia ei saanut laittaa liian kireälle, koska se vaikutti laudan ohjautuvuuteen, joten oikean jännityksen saaminen oli kokeiltava servoja ajamalla.

6 OHJELMISTOSUUNNITTELU

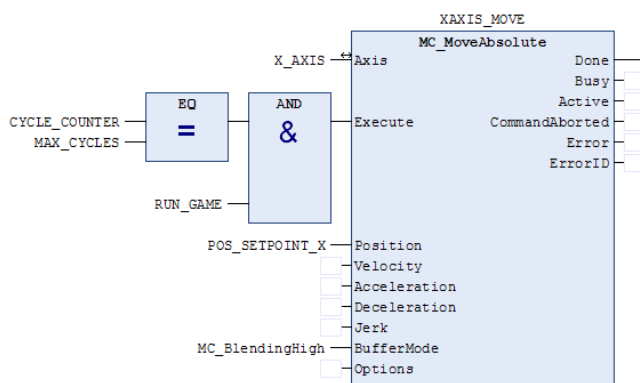
6.1 Logiikkaohjaus

Logiikan muistiin ladataan ulkoisella laitteella (PC:llä) tehty ohjelmakoodi, jota se pyörittää ohjelmakierron mukaisesti. Ohjelmakierrossa ohjelma lukee vaihe vaiheelta kirjoitetun koodin mukaisesti mm. sisään tulojen ja muistien tiloja, ohjaa ja lukee lähtöjä jne. Kun ohjelma on luettu loppuun, ohjelmakierto alkaa uudelleen. Esimerkiksi TwinCAT-järjestelmissä ohjelman käydään läpi oletusasetuksin 20 ms:ssa, mutta Beckhoffin XFC-tekniikalla päästään jopa 12,5 μ s kiertoaikaan (Beckhoff 2015. TwinCAT 3 eXtended Automation (XA)).

Ohjelmointikieli on standardoitu (IEC 61131-3) ja noudattaa samanlaisia lainalaisuuksia ohjelmointiympäristöstä riippumatta. Standardoituja esitystapoja automaatio-ohjelmoinnille on seuraavat:

- FBD (function block diagram) ns. toimintalohkokaaviot
- LD (Ladder Diagram) eli tikapuukaaviot
- ST (Structure Text) eli rakenteellinen teksti
- IL (Instruction List)
- SFC (Sequential Function Chart)

Toimintalohkokaaviossa (kuva 20) toiminnallisuudet esitetään graafisesti ja on käytetyin ohjelmointimuoto rakenteellisen tekstin ohella. Rakenteellinen teksti (kuva 21) on niin kutsuttua pseudokoodia, jossa toimintoja kutsutaan nimeltä.



KUVA 20. TwinCAT:in tapa näyttää toimintalohkokaavioita


```

1 X_AXIS_SCALING(VALUE_IN := CONTROLLER_XVALUE, VLRANGE := -13.0, VHRANGE := 13.0);
2 Y_AXIS_SCALING(VALUE_IN := CONTROLLER_YVALUE, VLRANGE := -13.0, VHRANGE := 13.0);
3
4 IF
5 ((X_AXIS_FILTERED + 0.5) < X_AXIS_SCALING.VALUE_OUT_LREAL ) OR ((X_AXIS_FILTERED - 0.5) > X_AXIS_SCALING.VALUE_OUT_LREAL)
6 THEN
7   X_AXIS_FILTERED := X_AXIS_SCALING.VALUE_OUT_LREAL;
8 END_IF

```

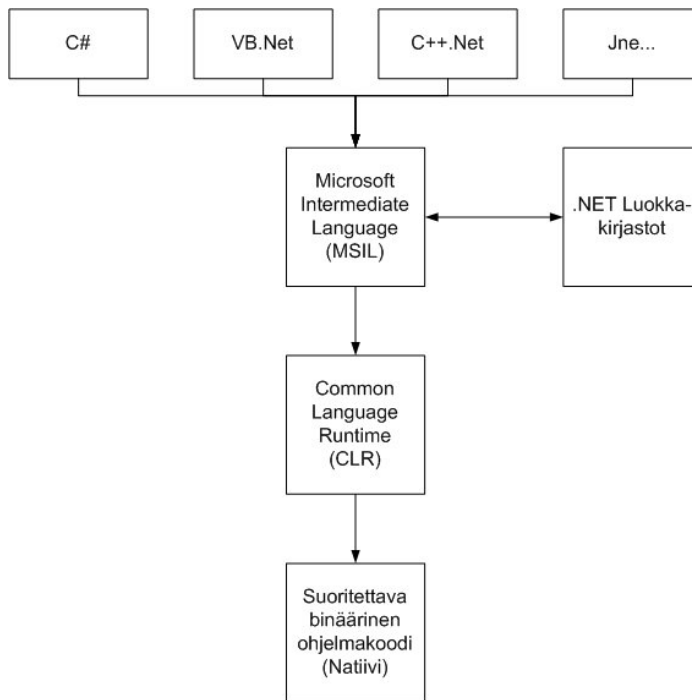
KUVA 21. Rakenteellinen teksti TwinCAT 3:ssa

6.2 TwinCAT ohjelmointiympäristö

Beckhoff käyttää omaa ohjelmointiympäristöä – TwinCAT, joka pohjautuu Microsoft Visual Studio – ympäristöön tehden ohjelmoinnista merkittävästi joustavampaa verrattuna kilpailijoihin. TwinCAT:in etuna kilpailijoihin nähden on useiden eri koodikielten yhdistäminen perinteiseen logiikkaohjelmointiin. (Beckhoff 2015.)

TwinCAT perustuu alla olevaan alustaansa Microsoft Visual Studio-ohjelmointiympäristöön ja sen käyttämään .NET Framework-ohjelmistokomponenttikirjastoon. .NET Framework tukee yli 20 eri ohjelmointi kieltä, joista käytetyimpiä ovat C#, C++ ja Visual Basic (Angshuman, Uday & Roopendra 2002, 68–69). Microsoft Visual Studiossa on perinteisten ohjelmointikielten lisäksi mahdollista käyttää myös Matlab ja Simulink – linkityksiä ja tuoda näissä ohjelmissa luotuja moduuleja tai simulaaitoita (Beckhoff. 2015. TwinCAT 3 eXtended Automation (XA)).

.NET Frameworkin erikoisuus TwinCAT:in kannalta on ohjelmointikielten yhteensovittaminen. .NET Framework koostuu kolmesta pääosasta: CLR:stä (Common Language Runtime eli virtuaalinen ohjelman ajoympäristö), MSIL eli lähdekoodin käännösohjeista ja luokkakirjastosta (Class Library) (kuva 22). (Angshuman ym. 2002, 70–71, 75–77.)



KUVA 22. .NET Frameworkin toimintaperiaate lohkokaaviona

CLR vastaa koodin suorittamisesta MSIL ohjeiden mukaisesti sallien eri kielten ajon samanaikaisesti (esim. C# ja VB). MSIL: in ohjeet sisältävät tiedot siitä, missä järjestyksessä osia ladataan, varastoidaan, alustetaan ja kutsutaan. Luokkakirjasto puolestaan sisältää kokoelman olioista (tietorakenteista eli tiedosta ja sen toiminnallisuudesta) ja uudelleen käytettävistä luokista. (Angshuman ym. 2002, 70–71, 75–77.)

6.3 Sovellussuunnittelu

Sovellussuunnittelussa keskityttiin PLC-koodin aikaansaamiseen eli kaiken toiminnallisuuden ohjaamiseen mittaustiedon perusteella. PLC-koodissa luetaan asentoanturin lähettämää tietoa, jonka perusteella käskytetään NC-yksikköä (liikenopeuksia laskeva ominaisuus TwinCAT 3:ssa). NC-yksikölle annetaan parametrit, joiden mukaan yksikkö laskee tarvittavat nopeudet ja kiihtyvyydet moottoreille.

6.3.1 Anturidata ja skaalauslohko

Anturin lähettämä tieto on analoginen milliampeeriviesti, jossa data-alue on 4-20 mA ja 0-4 mA – alue tulkitaan laiterikoksi. Analoginen viesti muutetaan PLC:llä digitaaliseksi.

PLC:n analogiakortin resoluutio on 16 bittiä, joten se tarkoittaa 65536 erilaista tilaa mitausalueella (-32768 – 32768). Mittausalue on kuitenkin rajoitettu positiiviselle puolella tarkoittaen 20 mA vastaavan arvoa 32768 ja 4 mA arvoa 0. Resoluution on huomattavan korkea ja sillä pystyttäisiin tutkimaan pienempiäkin muutoksia, mihin taas anturin ominaisuudet eivät yllä.

Moottorien ohjaamiseksi anturidatalla on data skaalattava sopivaan muotoon. Sovelluksesta riippuen moottoreita voidaan ohjata joko kuljetulla matkalla (mm) tai akselin kulmalla (°). Tässä sovelluksessa haluttiin ohjata pelilauta tiettyyn kulmaan, joten ohjausmuodoksi valittiin kulmatieto. Haluttu ohjauskulma oli $\pm 13^\circ$, joten skaalattuna anturin arvo 32768 tarkoittaa 13° , 0 - 13° ja 16384 arvoa 0° .

6.3.2 Moottorien ohjelmointi ja virittäminen

Servomoottorien ohjelmointiin löytyy hyvät työkalut TwinCAT 3 ohjelmistosta ja suuri osa työstä tapahtuukin automaattisin toimin. Kun servomoottorit ja -kortit on tunnistettu ja lisätty projektiin, niin muutama perusasetus tarvitsee käyttäjän tehdä. Moottorin ns. kilpiarvot tulee syöttää asetuksiin (taulukko 3). Jos tätä toimenpidettä ei tehdä tai se tehdään väärin, takaisinkytkennän kautta saatava tieto eroaa olennaisesti asetusarvoista ja ohjelma lopettaa moottoreiden pyörittämisen antaen samalla herjan jättämästä.

TAULUKKO 3. Servomoottorien kilpiasetuksien syöttäminen ohjelmassa

	Parameter	Offline Value	Online Value	Type	Unit
-	Encoder Evaluation:				
	Invert Encoder Counting Direction	FALSE		B	
	Scaling Factor Numerator	36.0		F	*/INC
	Scaling Factor Denominator (default: 1.0)	1048576.0		F	
	Position Bias	0.0		F	°
	Modulo Factor (e.g. 360.0°)	360.0		F	°
	Tolerance Window for Modulo Start	0.0		F	°
	Encoder Mask (maximum encoder value)	0xFFFFFFFF		D	
	Encoder Sub Mask (absolute range maximum value)	0x000FFFFF		D	
	Reference System	'INCREMENTAL'		E	
-	Limit Switches:				
	Soft Position Limit Minimum Monitoring	TRUE		B	
	Minimum Position	-20.0		F	°
	Soft Position Limit Maximum Monitoring	TRUE		B	
	Maximum Position	20.0		F	°
+	Filter:				
+	Homing:				
+	Other Settings:				

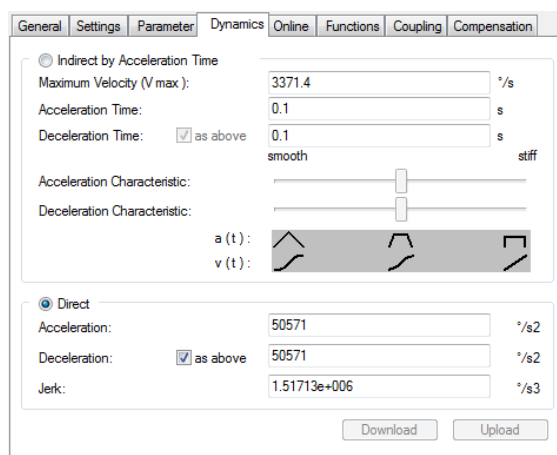
Kilpiasetusten lisäksi olennainen huomioitava asia on säätötapa. Yleisesti P-säädöllä pyritään toimimaan sen yksinkertaisen rakenteen vuoksi, mutta tarkempaa säätöä halutessa

voidaan käyttää integrointi- ja derivointiosia tarpeen mukaan. I- ja D-osat tuovat parempaa tarkkuutta säätöön, mutta eivät sovellu parhaiten jokaiseen prosessiin. Toisaalta ne teettävät myös turhaa työtä, jos pelkällä P-säätimellä on mahdollista pärjätä. (Airto 2015.)

P-säädössä on vahvistuskerroin, jonka avulla pyritään säätämään haluttu prosessi mahdollisimman todenmukaiseksi, joskin P-säädin jättää aina eroarvon. Vahvistuskerroin voidaan laskennallisesti määrittää siirtofunktion avulla, mutta menetelmä on hidas ja monimutkainen, joten kokeellinen menetelmä toimii useimmiten riittävän luotettavasti. (Airto 2015.)

Kilpiarvojen lisäksi on hyvä määrittää raja-arvot servon liikealueelle varmistamaan, etteivät virhetilanteissa moottorit pysty aiheuttamaan vaaratilanteita. Limit Switches – kohdassa (taulukko 3) määritetään suurin ja pienin asento, johon moottorin akseli voidaan ajaa. Jos nämä arvot saavutetaan, moottori pysähtyy ja ohjelma antaa virheilmoituksen. Liikettä ei jatketa ennen kuin virhetilanne on korjattu.

TwinCAT 3:n NC-lisäosan hyviä ominaisuuksia on automaattinen laskenta nopeuksille (kuva 23). Liikenopeuksien kannalta tarvitsee määrittää haluttu kiihtyvyys $\left(\frac{\circ}{s^2}\right)$, jarrutus $\left(\frac{\circ}{s^2}\right)$ ja kiihtyvyyden kiihtyvyys $\left(\frac{\circ}{s^3}\right)$. Kiihtyvyyden kiihtyvyys eli nykäys (jerk) tarkoittaa sitä kuinka nopeasti kiihtyvyyteen tai jarrutukseen mennään. Esimerkiksi hisseissä nykäyksen (kiihtyvyyteen reagoimisen) voi huomata parhaiten hissien jarruttaessa kerros tasalle (Kannela 2009, 39).



KUVA 23. Servomoottorin nopeuksien säätö

Nykyys ilmiönä voidaan havaita nimensä mukaisesti nykivänä liikkeenä. Tässä sovelluksessa liian suuri nykäys aiheutti laudalle niin suuren kiihtyvyyden, että pallo ei pysynyt

laudan mukana. Erittäin suuret liikenopeudet aiheuttivat myös rakenteellisia ongelmia huojumisen ja värähtelyn muodossa. Toisaalta mahdollisimman suuriin nopeuksiin pyrittiin pääsemään, jotta pelin vaste olisi lähellä reaaliaikaisuutta, eikä pelaaja pystyisi erottamaan viivettä ohjauksen ja ohjautumisen välillä.

7 JÄRJESTELMÄN VASTE

Aiemmissa luvuissa komponenttien valintojen yhteydessä on kerrottu laitteiden tärkeimpien ominaisuuksien ohessa myös niiden vasteaikoja. Vasteajat on koottu taulukkoon 4 ja niiden kokonaisajaksi muodostui 45,4 ms. Kyseinen aika kertoo missä ajassa yhden asteen muutos voidaan valituilla komponenteilla toteuttaa alimmillaan toteuttaa.

TAULUKKO 4. Kokonaisvasteajan muodostuminen

LAITE	VASTEAIKA
Servomoottori	400 μ s
Liikeanturi	25 ms
PLC	20 ms
YHTEENSÄ	45,4 ms

Vasteajan eli järjestelmän reagoiminen muutokseen on riippuvainen useista tekijöistä ja komponenttien viive on vain osa sitä. Tekijät voidaan jakaa karkeasti mekaanisiin ja ohjelmallisiin. Komponenttien vaste kuuluu mekaanisiin tekijöihin, mutta se koostuu myös laitteen muista osista kuten voimansiirrosta. Ohjelmallisia tekijöitä ovat säätöpiirin viritäminen ja toimintaa ohjaava algoritmi. (Ellis 2014, 5-6.)

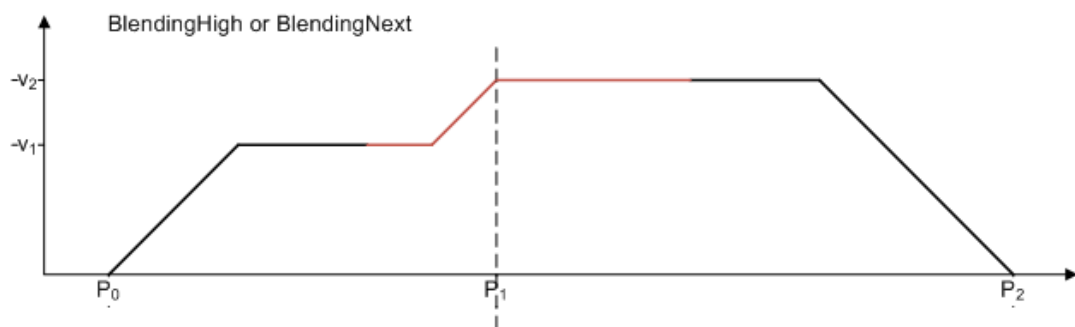
7.1 Algoritmi servo-ohjauksessa

Järjestelmän viiveen muodostuminen ei koostu pelkästään valittujen komponenttien kokonaisvasteajasta, vaan paljolti toimintaa ohjaavasti algoritmista. Algoritmina tässä tapauksessa toimii TwinCAT:in komponenttikirjaston MC_Move_Absolute - function block – lohko. Lohkon position-sisääntuloon tuodaan tieto halutusta sijainnista, joka liipaistaan execute-sisääntulolla. (Beckhoff 2016.)

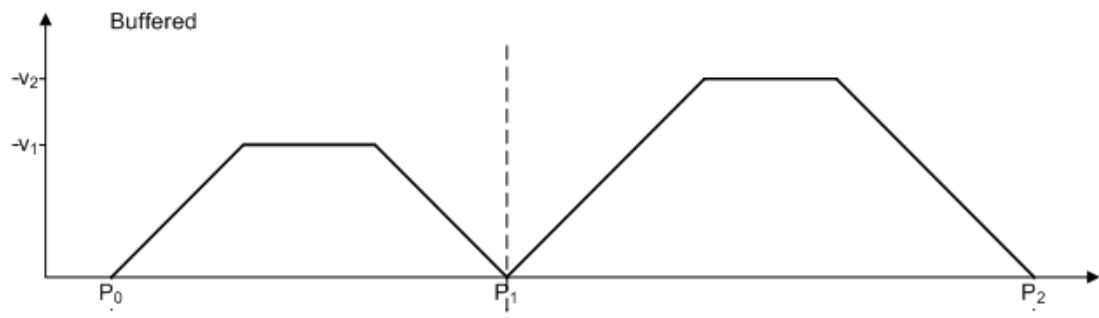
Algoritmin tehtävänä on päättää kulloisenkin asennon mukaan toiminta kuinka servon tulee ohjautua. Ohjaustieto voi vaihtua jo ennen kuin servo on päässyt kyseiseen setpointtiin, jolloin algoritmi pääättelee kiihdytetäänkö, jarrutetaanko vai jatketaanko tasaista vauhtia. TwinCAT:in valmiskirjastossa oleva MC_Move_Absolute-lohkon puskurin tehtävänä on varautua halutulla tavalla kesken ajon vaihtuvaan setpointtiin. Buffer mode eli

puskurin toimintatapoja on valittavissa muutamia, joista tässä työssä käytettiin BlendingHigh-moodia (kuva 24).

BlendingHigh eli sulautuminen seuraavaan -asetuksella algoritmi ottaa heti käsittelyyn muuttuneen asetustiedon ja pyrkii mahdollisuuksien mukaan kiihdyttämään suurempaan nopeuteen asetustiedon ollessa kaukana. Buffered-asetuksella (kuva 25) algoritmi käsittelee asetustietoja siinä järjestyksessä, kun tietoja tulee puskuriiin. Buffered-asetuksen haittapuolena on servomootorin puskurin ylivuoto ja mahdollisesti virhetilaan joutuminen, jos arvoja tulee nopeammin mitä servo ehtii asemoitua. (Beckhoff 2016.)



KUVA 24. Setpointtien käsittely algoritmissä - sulautuminen seuraavaan. (Beckhoff 2016 - Data type MC_BufferMode)



KUVA 25. Setpointtien käsittely algoritmissä - bufferointi. (Beckhoff 2016 - Data type MC_BufferMode)

7.2 Servo-ohjauksen virheet ja suorituskyvyn tehostaminen

Servo-ohjauksen tehostamisessa on useita tekijöitä, jonka vuoksi laitteen täydellinen vi-
rittäminen on haasteellista. Haasteita tulee järjestelmän useista komponenteista: servo-

moottorista, takaisinkytkennän antureista, servo-ohjaimesta ja voimanvälityksestä. Huonosti toimiva servojärjestelmä aiheuttaa epäonnistuneita tuotteita ja huonoa tehokkuutta laitteen toiminnassa. (Ellis 2011.)

Servojärjestelmän tehokkuuteen vaikuttavat tarkkuus, vaste ja luotettavuus. Tarkkuus voidaan määrittää vakioasentovirheen (settled-position error) ja syklisen virheen (cyclical error) kautta. Vakioasentovirheellä tarkoitetaan kalibroinnissa syntynyttä virhettä, jolloin servo ajaa joka kerta saman verran väärään paikkaan. Syklinen virhe toistuu jokaisella servon pyörähdyksellä jättäen pidemmällä matkalla suuremman absoluuttisen virheen, kuin lyhyellä. (Ellis 2011.)

Voimansiirrossa kuten akselikytkimissä ja voimansiirroissa voi syntyä mekaanisia virheitä. Näitä virheitä voidaan välttää käyttämällä laadukkaampia komponentteja, jotka yleensä myös maksavat enemmän. Servon tukiessa dual loop – takaisinkytkentää voidaan estää useita ongelmia tarkkuudessa. Dual loop – takaisinkytkennässä saadaan asentotieto myös vaihteiston toisiopuolelta. Yksinkertaisin tapa eliminoida mekaanisia ongelmia on direct drive eli kytkeä servomoottori suoraan ilman vaihteistoa. (Ellis 2011.)

7.3 Takaisinkytkennän ongelmat

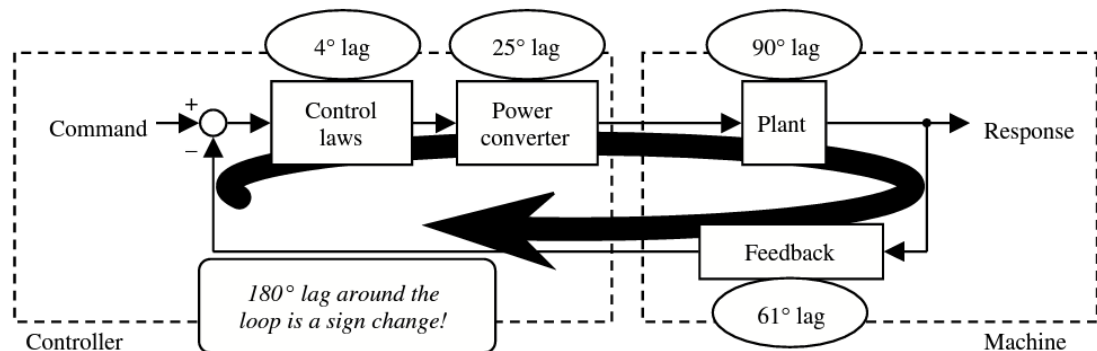
Virittämisessä pyritään löytämään takaisinkytkennän säädölle oikeat vahvistusarvot, joilla järjestelmän suorituskyky saadaan halutulle tasolle. Sovelluksesta riippuen virittäminen voi olla erittäin haastavaa. Kuitenkin useimmiten virittämisen ongelmat johtuvat tiedon puutteesta kuin järjestelmän monimutkaisuudesta. (Ellis 2004, 31.)

Vahvistuksien määrittämisellä saadaan optimoitua järjestelmän vaste. Suurilla vahvistuksilla saadaan parannettua vastetta, mutta samalla myös epävakauden riski kasvaa. Epävakaus ilmiönä syntyy takaisinkytkennän viiveistä. Toisin sanoen viiveiden lyhentäminen takaisinkytkennässä mahdollistaa suurien vahvistuksien käytön. Tästä syystä järjestelmän komponenteilta vaaditaan korkeaa näytteenottonopeutta ja suurinopeuksista anturointia. (Ellis 2004, 31.)

Takaisinkytkennän on aina oltava arvoltaan negatiivinen, jotta järjestelmän vaste korjaantuisi erotuksen mukaisesti vastaamaan haluttua ohjausarvoa. Positiivisella takaisinkytkennällä järjestelmä pyrkii korjaamaan virhettä koko ajan suuremmalla arvolla, jolloin järjestelmän vaste karkaa yhä kauemmaksi. Positiivinen takaisinkytkentä voi olla seurausta virheellisestä kytkennästä. (Ellis 2004, 32.)

Väärin tehdyt kytkennät eivät kuitenkaan ole ainoa selitys positiiviselle takaisinkytkennälle. Virhe voi muodostua myös merkittävästä vaihe-erosta vasteen ja ohjauksen väliltä. Vaihe-erosta muodostuva järjestelmän epävakaas syntyy yleensä vain tietyllä taajuudella. Toisin kuin väärin kytketyissä johdotuksissa, vaihe-erosta johtuva epävakaas ilmenee oskillointina ohjausarvon ympärillä. Ongelmataajuutta ei voida myöskään suodattaa pois, koska se syntyy yleisen kohinan seurauksena. (Ellis 2004, 32.)

Kuvassa 26 on esitetty vaihe-eron syntyminen ohjausjärjestelmässä. Järjestelmä on viritytty 240 Hz:n siniaallolla. Jokainen järjestelmän komponentti muodostaa vaihe-eroa: säädin muodostaa 4° , jännitemuunnin 25° ja kone 90° . Takaisinkytkennän sisäiset ominaisuudet muodostavat 61° . Kokonaissummaksi vaihe-erolle syntyy 180° ja tarkoittaa, että 240 Hz:n sinisignaali muodostaa positiivisen takaisinkytkennän. (Ellis 2004, 33.)



KUVA 26. Vaihe-eron muodostuminen säätöjärjestelmässä. (Ellis 2004, 32.)

8 POHDINTA

Toukokuussa 2015 esimieheni Sami Kervolan esitellessä tätä mahdollisuutta tehdä Protacon Groupille uusi messudemo opinnäytetyönä, olin hyvin yllättynyt tarjotun aiheen laajuudesta. Ajatukset projektin onnistumisesta herättivät epäilyksiä. Projektin ainoana tekijänä en ollut kovinkaan kokenut varsinkin, kun olin suorittamassa vasta ensimmäistä harjoitteluani konealalla. Kuitenkin kunnianhimo ja päättäväisyys siirsivät ajatukset epäonnistumisen mahdollisuudesta pois.

Projekti oli erittäin haastava. Suunnittelun yhdistäminen toteutukseen oli työteliästä, mutta erityisen opettavaista. Ensimmäistä kertaa suunnitelmilla ja kaikilla sen yksityiskohdilla oli merkitystä. Suunnittelun virheet ja puutteet tulivat vastaan käytännön toteutuksessa, minkä seurauksena olivat poikkeamat aikataulussa ja budjetissa. Toisaalta suunnittelun virheet olivat odotettavissa, koska aikataulu ei antanut periksi täydellistä hiomista ja viilaamista – asioissa oli päästävä eteenpäin ja etenkin alihankinnan ja kesän lomaseurakien vuoksi suunnitelmat oli saatava toteutukseen ajoissa.

Yksittäinen suurin haaste projektin läpiviemisessä oli oma kokemattomuus ja käytännön osaaminen. On helppoa keksiä ongelmiin teoriassa ratkaisu, mutta ratkaisun käytännön toteuttaminen ilman kokemusta olemassa olevista ratkaisuista, tietoa komponenteista ja toimittajista on äärimmäisen haastavaa. Tietoa ratkaisuista ja mahdollisuuksista täytyy kerätä kaikkialta, mitä helpottaa asioista puhuminen mahdollisimman suuren määrän ihmisiä kanssa, jolloin erilaisista näkemyksistä pystyy prosessoimaan oman ratkaisun. Parhaita tiedonlähteitä ovat materiaali- ja komponenttitoimittajat.

Kaikista haasteista huolimatta, projekti saatiin pidettyä aikataulussa ja sille ennalta määritetyt tavoitteet täytettiin. Messudemo esiteltiin aikataulun mukaisesti Alihankinta 2015 – messuilla Tampereen Messukeskuksessa Protacon Groupin messupisteellä 15.–17.9.2015 (liite 1).

Määritetty budjetti ei riittänyt alkuperäisellä tavoitteellaan, mutta anottu lisäbudjetti hyväksyttiin ja senkin puolesta projekti vietiin onnistuneesti maaliin. Budjettia arvioitaessa haasteena oli tietämättömyys komponenttien hinnoista, valmistajien halusta osallistua näkyvyyden ja yhteistyön kannalta projektiin.

Tutkimusongelmana ollutta reaaliaikaisuutta ei saavutettu, kuten alkuperäinen olettaus oli. Keskeisimmät syyt tutkimusongelman saavuttamiseen johtuivat laitteiden sisäisistä ominaisuuksista toimia viiveettömästi. Merkittävin tekijä kuitenkin viiveen muodostumisessa on servon ohjauksesta vastaava säätö.

Tutkimuksessa havainnoitiin ongelmia myös mekaanisella puolella. Suureksi ongelmaksi muodostui lyhyen vasteen tavoittelussa myös putoamiskiihtyvyyttä nopeammat kiihtyvyydet. Pelaajan nopeissa ohjaimen liikkeissä kiihtyvyys muodostui suuremmaksi kuin putoamiskiihtyvyys ja näin ollen pelilauta irtosi pallosta aiheuttaen pallon pomppimisen. Tässä tapauksessa lyhyen vasteen sijasta kompromissiksi valittiin tarkka ja sulava liike mahdollisimman pienellä vasteella.

Tutkimuksen johtopäätöksenä on, että reaaliaikaista vastetta ei ole mahdollista saavuttaa. Lähemmäksi tavoitetta olisi voitu päästä säädön huolellisemmalla virityksellä.

Työntekijänä olen tyytyväinen lopputulokseen ja pidän sitä kaikin puolin onnistuneena ja tilaajan asettamat tavoitteet täyttävänä. Jälkiviisaana joitain asioita toki tekisin toisin, mutta kaikki valinnat ja päätökset on mielestäni hyväksyttäviä kulloinkin tilanne huomioon ottaen. Prosessi kokonaisuudessaan on ollut erittäin opettavainen erityisesti suunnittelun osalta. Koulussa saatu perusoppi on ylimalkaista ja tarkempi tietämys on saatavilla vain työelämän kautta.

Tärkeimpinä yksittäisinä opittuina asioina on automaattisuunnittelu / -ohjelmointi, PLC-komponentit ja servokäytöt. Käytännön tekemisen ja suunnittelun lisänä opinnäytetyön kirjallinen osuus on auttanut ymmärtämään toteutettuja asioita syvällisemmin.

Työn lopputulos (messudemolaite) on tällä hetkellä Protacon Groupin käytössä ja se on dokumentoitu järjestelmän käyttäjiä varten.

LÄHTEET

Airto, A. 2015. Servo commissioning. Hyvinkää: Beckhoff Automation Oy.

Allied Vision. 2015. Out Now: Five New Mako Camera Models With CMOS and CCD Sensors. Luettu 22.9.2015. https://www.alliedvision.com/fileadmin/content/news_image/AVT-Mako-G-persp-shadow.jpg

Angshuman, C., Uday, K., Roopendra, J. & Sandhu with NIIT. 2002. NET Framework : professional projects. Rocklin, Calif.: Premier Press.

Beckhoff. 2015. AM81xx. Luettu 28.9.2015. http://www.beckhoff.com/english.asp?drive_technology/am81xx.htm?id=5569119842950

Beckhoff. 2015. CX9020. Luettu 28.9.2015. http://www.beckhoff.com/english/embedded_pc/cx9020.htm?id=5563118742705

Beckhoff. 2015. Embedded PCs and motherboards for industrial control tasks. Luettu 28.9.2015. http://www.beckhoff.com/english.asp?industrial_pc/ipc.htm?id=3443

Beckhoff. 2015. EL7201-0010. Luettu 17.10.2015. http://www.beckhoff.com/english/ethercat/el7201_0010.htm?id=693180619568743

Beckhoff. 2015. KL3152. Luettu 17.10.2015. http://www.beckhoff.com/english/bus_terminal/kl3152.htm?id=1096711604639

Beckhoff. 2014. Servo cables AM81xx/AM31xx at EL7201. Documentation. – –

Beckhoff. 2015. Synchronous servomotor AM8100. Documentation. – –

Beckhoff. 2015. TwinCAT 3 eXtended Automation (XA). Flyer. – –

Beckhoff. 2016. TwinCAT PLC Library: MC Library 2. Luettu 24.1.2016. http://infosys.beckhoff.com/italiano.php?content=../content/1040/tcplclibmc2/html/blocks/tcplclibmc_moveabsolute.htm&id=

Beckhoff 2016. Data type MC_BufferMode. Luettu 1.2.2016. <http://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tcplclibmc2/458454795.html&id=25686>

Ellis, G. 2004. Control System Design Guide. Using Your Computer to Understand and Diagnose Feedback Controllers. 3. painos. USA, Waltham: Elsevier Inc.

Ellis, G. 2011. How to perk up servo performance. Luettu 24.1.2016. <http://machinedesign.com/motorsdrives/how-perk-servo-performance>

Ellis, G. 2014. Control System Design Guide. Using Your Computer to Understand and Diagnose Feedback Controllers. 4. painos. USA, Waltham: Elsevier Inc.

Instructables.com. 2015. DIY Android Ball Maze - An Introduction to the Android ADK. Luettu 22.9.2015. <http://www.instructables.com/id/DIY-Android-Ball-Maze-An-Introduction-to-the-And>

Kannela, S. 2009. Hissin ajokäyrän raja-arvojen määrittäminen. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Espoo: Metropolia ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Pepperl+Fuchs. 2015. Inclination sensor INY030D-F99-2I2E2-5M. Datasheet. – –

Protacon Group. 2015. Pro planning is pro quality. Luettu 7.9.2015. <http://www.protacon.com/>

LIITTEET

Liite 1. Messujulkaisu



Etusivu

Palvelut

Tuotteet

Toimialat

Yritys

Rekry



Protacon Group

Pro planning is pro quality

Protacon Group on suomalainen sähkö- ja automaatiotekniikan ohjelmistotuotannon suunnittelu- ja palveluyritys. Tavoitteenaan tuottavuutta ja kilpailukykyä edistäviä luotettavia, tehokkaita ja myynnin, tuotannon, ylläpidon ja projektoinnin tarpeisiin.

LUE LISÄÄ »

» Yritys » Ajankohtaista

15.09.2015

Protacon haastaa pk-konepajat tarkastelemaan prosessejaan Alihankintamessuilla

[Lisää uut](#)



”Viritettiin vähän labyrintti-peliä”

Teknologiayhtiö Protaconilla on viime päivinä viritelty kuumeisesti labyrintti-peliä. Useimmille lapsuudesta tuttu peli ei olekaan enää mikään tahansa lautapeli, vaan opinnäytetyönä tehtyyn messudemoon on yhdistetty huipputeknologioita siten, että nyt luulisi insinöörinkin innostuvan.

Erilaisia ohjelmistoratkaisuja on usein vaikea havainnollistaa varsinkin pienissä näyttelytiloissa. Protacon ratkaisi tämän jatkojalostamalla perinteistä lautapeliä siten, että se ensinnäkin herättäisi messuvieraissa innostusta pelaamaan ja toisaalta peilaisi laajalti yhtiön osaamista. Messudemossa yhdistyvät muun muassa: konseptisuunnittelu, projektointiosaaminen, sähkösuunnittelu, sähkökäytöt, automaatio, ohjelmistot, käyttöliittymäsuunnittelu ja konenäkö.

– Labyrintti on oikeastaan tyypillinen ”MES (Manufacturing Execution System) -esimerkki materiaalivirtojen ja varastonhallinnan ohjauksesta sekä ongelmanratkaisusta. Pelissä pallo menee aina välillä pois reitiltä, aivan kuten tavarat tuotevirrasta – tuotannon välivarastoja on usein siellä ja täällä, mikä tuo haastetta järjestelmien suunnittelulle. Lähdestä maaliin on lukuisia reittejä, kuten vaikkapa konepajoilla. Kaikissa niissä on erilaiset prosessit, joiden hallintaan tarjoamme joustavia ratkaisuja, kertoo aluepäällikkö **Sami Kervola** Protaconilta.

Tuotannonohjausjärjestelmä lisääisi tuottavuutta pk-yrityksissäkin

Yhtiön ProMES-tuotannonohjausjärjestelmä, jonka ominaisuuksia labyrintti-pelikin peilaa, kuuluu samaan tuotepereheeseen kuin RoAd, joka kehitettiin aikoinaan paperiteollisuuden tarpeisiin. Järeissä prosesseissa koetellusta järjestelmästä on jo toistasataa toimitusta maailmanlaajuisesti. Nyt siitä on kehitetty uusi, muun muassa pk-konepajojen tarpeita vastaava, ProMES-järjestelmä tavaravirtojen ja varastojen hallintaan. Tiettyiltä osin vakioidut työkalut mahdollistavat myös kilpailukykyisen hankintahinnan.

– Tuotannonohjausjärjestelmiä ei vielä hyödynnetä kovinkaan paljon pk-yrityksissä, vaan niissä tehdään edelleen usein käsipelillä ohjausta. Myynnin olisi kuitenkin tärkeä tietää, mitä tavaraa nurkissa pyörii. Reaaliaikainen materiaalinseuranta tienaa äkkiä itsensä takaisin monissa pienemmissäkin yrityksissä, liiketoimintajohtaja **Hannu Lasander** toteaa.

Joustava, tarvittaessa pilvipalveluna tarjottava, ERP-järjestelmien kanssa kommunikoiva ja mobiililaitteillakin käytettävä ProMES-järjestelmä lisää toiminnan laatua ja tuo kustannushyötyä erityisesti sellaisten tuotteiden kohdalla, joissa on viranomaisvalvonta. Järjestelmästä on hyötyä myös tuotannossa, jossa on tärkeää varmistaa nopea kiertoaika, tai jossa esimerkiksi komponenttien särkyminen aiheuttaa vaaraa.

– Tällainen on esimerkiksi elintarviketeollisuus, jossa tarvitaan tarkka tavaranseuranta. Toimitusketjun hallinta on erityisen tärkeää myös silloin, kun on paljon volyymia, tuhansia komponentteja varastossa, jolloin on suurempi riski, että asiat ovat hukassa, Lasander luettelee.

Esimerkiksi viime syksynä Protacon toimitti metalliteollisuuden alalla toimivalle Leimet Oy:lle tuotannonohjausjärjestelmän. Raumalainen perheyritys valmistaa korkealuokkaisia betonipaalutuksessa käytettäviä komponentteja, joiden valmistuslinjat ovat pitkälle robotisoituja. Seurannan automatisoinnin myötä tuotteisiin tulee kunnolliset etiketit ja lähetyslistat automaattisesti. Tämä kaikki vähentää inhimillisen virheen riskiä ja parantaa tuotannon läpinäkyvyyttä sekä jäljitettävyyttä huomattavasti.

Labyrintti-pelissä yhdistyvät uusimmat teknologiat

Tampereen ammattikorkeakoulussa konetekniikkaa opiskeleva Lauri Hiekkalahti sai tilaisuuden syventää tietojaan työharjoittelussa Protaconilla, jossa hän rakensi labyrintti-peliä opinnäytetyönään.

– Itse en ole juurikaan ehtinyt pelata sillä, mutta oli mielenkiintoista opetella automaatio-ohjelmointia, tutustua insinöörin työhön ja päästä näkemään, minkälaista se on, kun lähdetään tekemään oikeasti jotain sovellusta, Hiekkalahti kertoo.

Labyrintissa konenäkö tulkitsee pallon liikkeitä. Pelin yläpuolelle on kiinnitetty konenäkökamera, joka tutkii, onko pallo laudalla sekä mittaa pallon kulkemaa matkaa ja peliin kulunutta aikaa. Kosketusnäyttö-pc:llä näkyy tuloksia reaaliaikaisina sekä lopputulema: paljonko meni aikaa, pääsikö läpi ja mille sijalle pelaaja sijoittui.

– Opin esimerkiksi mekaniikkasuunnittelua, kun tässä on ihan lähtökohtaisesti suunniteltu rakenteet laitteelle. Servomootoreiden avulla liikutetaan labyrintin lautta ja servon takaisinkytkennän avulla voidaan verrata asentotietoa kauko-ohjaimen pohjassa olevaan asentoanturiin, jolla pelaaja ohjaa labyrinttilautaa, kertoo automaatio-ohjelmoinnin pariin tulevaisuudessa aikova Lauri Hiekkalahti.

Protacon on mukana Alihankinta 2015 -messuilla Tampereella 15.–17.9. osastolla C222.

Tervetuloa!

Lisätietoa:

Sami Kervola, aluepäällikkö, Protacon
p. 040 583 2024, sähköposti: sami.kervola@protacon.com

Hannu Lasander, liiketoimintajohtaja, Protacon
p. 040 589 4479, sähköposti: hannu.lasander@protacon.com

Protacon Group
puhelin 010 3472 600
faksi 010 3472 601

LinkedIn
Facebook
Yhteydenotto
Kaikki yhteystie